

白皮书
2019-07

IMT-2020
IMT-2020 (5G) 推进组

5G 同步组网架构及关键技术



目录

引言	P1
5G同步需求	P2
5G高精度时间同步组网模型	P5
5G高精度同步关键技术	P8
总结与展望	P14
主要贡献单位	P15

引言

5G牌照已经发放，5G商用蓄势待发。5G网络正处于标准完善和产业化培育应用的关键时期，5G同步网作为必不可少的基础支撑网络，急需在技术和产业发展方面尽快推动，有力支撑5G商用。

5G同步用于支撑5G网络和业务，包括频率同步和时间同步，频率同步相对于现有无线通信系统并无明显变化，而时间同步则要求更加严格，本白皮书重点研究了5G时间同步组网架构和关键技术。

本白皮书在分析5G系统时间同步需求的基础上，结合应用场景、安全可靠、成本等多方面因素，剖析基于高精度时间同步地面组网解决5G系统同步的必要性，并提出高精度同步通用组网模型，重点研究了高精度源头、高精度同步传输、高精度同步监测等关键技术。本白皮书将为我国后续5G同步技术方案选择及组网策略制定、国际国内标准推动、同步网平滑演进等提供重要指引。

5G同步需求

1 5G基本同步需求与4G相同

基本时间同步是所有时分复用（TDD）制式无线通信系统的共性要求，其对基站空口时间偏差进行严格限定，主要是为了避免上下行时隙干扰。

在TDD制式无线通信系统实际部署时，基站间同步偏差、保护周期（GP）、基站收发转换时间、小区覆盖半径等多方面因素相互制约，应满足如下关系：

$$T_{\text{Sync}} < (T_{\text{GP}} - 2 * T_{\text{prop, BS1-BS2}} - T_{\text{BS on} \rightarrow \text{off}} - T_{\text{BS off} \rightarrow \text{on}}) / 2 \quad \dots\dots\dots \text{公式 (1)}$$

其中， T_{Sync} 是基站间时间偏差， T_{GP} 是保护周期时间， $T_{\text{BS on} \rightarrow \text{off}}$ 是基站从“开”到“关”的转换延迟， $T_{\text{BS off} \rightarrow \text{on}}$ 是基站从“关”到“开”的转换延迟， $T_{\text{prop, BS1-BS2}}$ 是基站间距离引入的传输时延。

根据公式（1），各种影响因素相互关系如表1所示。

表1 各种影响因素相互关系

频段	Sub 6G			Above 6G	
子载波间隔（kHz）	15	30	60	60	120
T_{GP} （us）	71.4 单符号	71.4 2 符号	71.4 4 符号	17.8 单符号	17.8 2 符号
$T_{\text{BS, on-off}}$ （us）	10	10	10	3	3
$T_{\text{BS, off-on}}$ （us）	10	10	10	3	3
T_{Sync} （us）	3	3	3	3	3
$T_{\text{prop, BS1-BS2}}$ （us）	<22.7	<22.7	<22.7	<2.9	<2.9
基站间距离（km）	<6.8	<6.8	<6.8	<0.87	<0.87

根据表1，对于目前普遍采用的6G以下频段，4G TDD系统采用固定子载波间隔15kHz，GP配置单符号，保护周期时间为71.4μs，在一定覆盖范围内，要求基站间时间偏差应小于3μs。5G 系统根据子载波间隔可灵活扩展的特点（即NR的子载波间隔可设为 $15 \times (2^m)$ kHz， $m \in \{-2, 0, 1, \dots, 5\}$ ），通过在GP中灵活配置多个符号的方式，使得基站间时间偏差要求仍应小于3μs，与4G TDD基本时间同步需求相同。

2 5G协同增强提出100ns量级高精度需求

站间协同增强是指到同一个用户的数据可以通过不同基站的有源天线单元（AAU）收发，使用户可以在交叠覆盖区合并多个信号，从而有效提升业务带宽。多信号间的时延差须满足一定要求，否则无法合并。根据3GPP TS36.922协议描述，站间协同要求满足如下关系：

$$TD1 + TD2 + TD3 = \text{Total TD} \leq CP \dots\dots\dots \text{公式 (2)}$$

其中，TD1为不同AAU空口到用户终端（UE）因不同距离产生的时延差，TD2为多径传播导致的时延差，TD3为不同AAU空口之间的时间偏差，Total TD为不同AAU信号到达UE侧的时间总差值，CP为防止符号间干扰的循环前缀。根据公式（2），为顺利实现协同功能，不同AAU空口信号到达UE的总时差应小于CP的长度。

根据3GPP R4-1802142 CR 38104-f00，不同类型的协同增强同步要求如表2所示，其中，多入多出（MIMO）和发射分集技术的时间偏差要求为65ns，对于带内连续载波聚合（CA），低频基站（Sub 6G）时间偏差要求为260ns，高频基站（Above 6G）时间偏差要求为130ns，带内非连续CA和带间CA的时间偏差要求均为3μs。

表3给出了5G协同增强技术应用场景说明。其中，MIMO、发射分集、带内连续CA主要发生在AAU内部，很小可能发生在同一基站的不同AAU之间，而带间或带内非连续CA则正好相反，主要发生在同一基站的不同AAU之间，很少发生在AAU内部，另外，各种协同增强均基本上不发生在不同基站的AAU之间。

表2 5G不同类型的协同增强同步要求

基站类型	协同增强类型	时间偏差要求	备注
BS 类型 1-0	MIMO 和发射分集	65 ns	针对低频基站（sub 6G）
	带内连续 CA	260 ns	
	带内非连续 CA	3 μs	
	带间 CA	3 μs	
BS 类型 2-0	MIMO 和发射分集	65 ns	针对高频基站（above 6G）
	带内连续 CA	130 ns	
	带内非连续 CA	3 μs	
	带间 CA	3 μs	

表3 5G协同增强应用场景说明

协同增强类型	AAU 内部	同一基站的 AAU 之间	不同基站的 AAU 之间
MIMO, 发射分集	Y	可能性非常小	从不
CA（带内连续）	Y	可能	从不
CA（带间或带内非连续）	很少	Y	从不

综上，为了提升覆盖效率和服务体验，多天线MIMO、多点协调、载波聚合等协同增强技术将在5G系统中得到更广泛的应用。为了确保协同有效，来自不同协同点信号的时间差不能超过循环前缀CP，从而对协同点之间的时间偏差提出了100ns量级甚至更高的苛刻要求。

3 部分新业务需要更高精度同步

5G网络支撑的多种新业务可能具备高精度同步需求，包括高精度定位业务、高速移动业务覆盖、业务时延精确测量、各种垂直行业应用（如物联网，车联网，智能制造）等。典型的基站定位服务，主要基于到达时间（TOA）或到达时间差（TDOA）技术，时间同步精度与定位精度要求直接相关。例如，要满足3m的定位精度，要求基站间的空口信号同步偏差为 $\pm 10\text{ns}$ ；要满足m级的定位精度，要求基站间的空口信号同步偏差为 $\pm 3\text{ns}$ 。5G基站部署密度大，基于基站提供定位服务具有天然优势，特别是在卫星信号覆盖盲区，该优势更加凸显。随着高精度定位服务需求爆炸式增长，作为定位服务提供的重要手段，基于5G系统基站定位极具潜力，可与其它定位技术相结合，满足m级及以上的定位需求。

5G高精度时间同步组网模型

1 5G高精度同步地面组网是大势所趋

长期以来，运营商主要采用在基站加装卫星接收机的方式满足无线移动通信系统的同步需求。在4G时代，部分运营商通过地面同步组网方式解决无线基站的同步问题，但一般作为备用，或者用于解决卫星信号难以覆盖区域的基站同步，如地铁、地下车库、部分城区高楼等。

相对于4G系统，5G系统具有如下新的同步需求特点：

- 同步需求精度更高。根据第2部分分析，5G系统既有 μs 量级的基本业务同步需求，也有100ns量级的协同增强技术同步需求，还有其它新业务的更高精度同步需求，基站直接通过普通卫星接收机单站授时难以完全满足要求；

- 同步应用场景更加复杂。5G系统的一大特点是部分应用场景基站部署密度大，随着中国城市化不断推进，室内基站占比增大，将会存在大量无法获取卫星信号的5G基站部署场景；

- 同步的安全性要求更加严格。同步是确保5G系统安全可靠运行的前提，鉴于5G系统本身及其所支撑业务的重要性，相应对同步的安全性也提出更高的要求。考虑到卫星信号受到无意或有意干扰导致失效的情况越来越多，卫星信号被攻击（如伪卫星欺骗）的案例时有发生，5G同步完全依赖于卫星授时将会带来极大安全隐患；

- 成本方面更加敏感。5G基站部署规模大，若每个基站均加装卫星接收机，设备投资和运维成本巨大，而通过承载网络带内方式实现地面高精度同步组网，建设与运维成本相对较低。

鉴于上述分析，为满足5G系统的同步需求，解决卫星覆盖盲点问题，提升安全性，节约建设和运维成本，研究建设自主可控、安全可靠的高精度时间同步网是大势所趋、非常必要。需要说明的是，建设高精度地面时间同步网，并不会一步到位完全替代基站卫星授时方案，两者是天地互备的关系，将会长期共存、相互补充。

2 5G高精度同步通用组网模型

国内CCSA，国外ITU-T、3GPP、CPRI、IEEE以及ORAN等多个标准化和行业组织正针对5G同步解决方案开展研究。目前来看，相对于光纤授时、网络时间协议（NTP）等技术，基于高精度时间协议（PTP）组网是5G高精度时间同步的最主要实现方案。

基于PTP的5G高精度时间同步通用组网模型如图1所示。

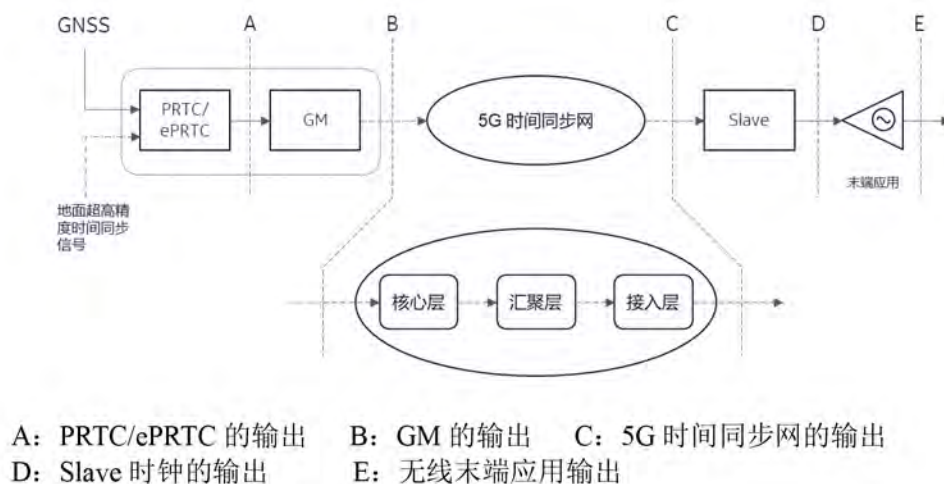


图1 5G高精度时间同步通用组网模型

作为源头设备的高精度时间服务器（PRTC/ePRTC）可采用卫星授时关键技术（见第4部分第1节），在卫星不可用的情况下，可通过地面获取超高精度时间同步信号（如通过光纤授时溯源至国家守时单位），从而确保5G时间同步网自主可控。PRTC/ePRTC通常同时实现祖时钟（GM）功能，因此图1参考点A一般位于设备内部，在这种情况下无需对其性能要求进行规范。高精度时间服务器的性能指标应满足ITU-T G.8272.1标准的要求，即时间精度应优于 $\pm 30\text{ns}$ 。

图1参考点B和C之间属于5G时间同步网的核心部分，可采用高精度同步传输技术（见第4部分第2节）实现高精度同步承载，属于由多个电信用边界时钟（T-BC）组成的同步链。需要强调的是，单个节点的时间同步性能和网络规模（时间同步链的跳数）是B与C之间承载部分同步指标的两个重要制约参数。为了提升端到端同步性能，扩大组网规模，要求传输设备单节点时间同步精度应优于一定的限值（例如，ITU-T G.8273.2规定类型C和类型D的T-BC的时间误差在10ns量级甚至更小）。

图1中参考点C或D属于5G时间同步网与无线末端设备（如5G基站）连接点，可考虑采用高精度同步接口（如带内10GE/25GE光）进行对接，降低局内互联引入的时间误差。在5G组网中，通过对5G网络无线接入网（RAN）侧功能的重新划分，以及基于以太网的eCPRI接口在前传中的使用，图1中从时钟（Slave）可能和末端应用（例如AAU）集成在同一设备中，因此参考点D有可能位于无线设备内部。

5G同步需求一般是以无线空口（图1参考点E）间的相对时间偏差来衡量，而同步网一般通过实现相对于协调世界时（UTC）的绝对时间精度来满足无线侧的相对时间精度要求。例如，为了满足两个AAU的无线空口参考点E之间的相对时间偏差（如 $3\mu\text{s}$ ），要求每个AAU无线空口输出相对于UTC的绝对时间偏差满足一定的限值即可（如 $\pm 1.5\mu\text{s}$ ）。

5G高精度同步关键技术

1 高精度同步源头技术

高精度同步源头的实现与卫星授时技术密不可分。卫星授时的精度取决于卫星系统、大气层、接收系统、本地钟源、锁相环和分发接口等多个要素，其中卫星接收部分对精度的影响比重最大，提升卫星接收部分的精度成为5G时间服务器精度提升的关键。

1.1 卫星单频单向授时精度受限

卫星单频授时是目前传统的也是应用最广泛的卫星授时技术，一般采用单向授时。卫星接收机在进行单向授时时，存在位置坐标 (x, y, z) 以及时间 t 共4个未知参数，因此需要接收4颗或4颗以上的卫星才能实现授时。卫星授时主要由伪距测量实现，通过适当的方法减弱或者消除伪距测量中误差的影响是提升卫星授时精度的关键。

卫星单向授时存在三类误差来源：一类是和卫星有关的误差，包括星历误差、卫星钟差、多普勒频移及相对论效应等；第二类是与信号传播有关的误差，如对流层延迟误差、电离层延迟误差和多路径效应等；第三类是和接收机本身相关的误差，比如接收机测量噪声、用户机设备零值等。受限于上述三类误差，单频接收机单向授时的理论授时精度只能达到约100ns。

卫星单频单向授时技术成熟，成本较低，可独立部署应用，但无法解决性能监测问题，精度无法满足高精度源头设备（如ePRTC）的要求。

1.2 卫星双频技术显著提升授时精度

为提升授时精度，在卫星授时方面可采用双频接收技术，相对于单频接收机而言，双频接收机可同时接收单个卫星系统的两个频点载波信号（如GPS的L1、L2，或者北斗的B1、B2），通过一定算法可有效消除电离层对电磁波信号延迟的影响，从而提升卫星授时精度。

在具体算法方面，业界常见的修正电离层延迟的算法主要包括双频码观测量修正法和双频载波观测量修正法，也可同时使用上述四个观测量进行求解和修正。卫星双频技术的授时精度可以达到 $\pm 30\text{ns}$ 左右。

卫星双频技术能够满足高精度源头设备性能要求，可以独立部署应用，可作为高精度时间服务器实现技术。相对传统单频卫星技术来说，双频卫星技术成本较高，建议在产业化方面加大推动力度，扩大商用规模，降低成本。

1.3 卫星共视技术可实现远距离高精度溯源

卫星共视法是目前远距离时钟比对的主要方法之一，也是国际原子时合作的主要技术手段之一。卫星共视法是在单向授时的基础上，主从两个站分别同时测量本地时钟与导航系统时间的时差，然后两个站交换测量数据，时差相减获取两站本地时间的时差，通过从站时间调整，实现从站溯源至主站。共视法基本原理如图2所示。

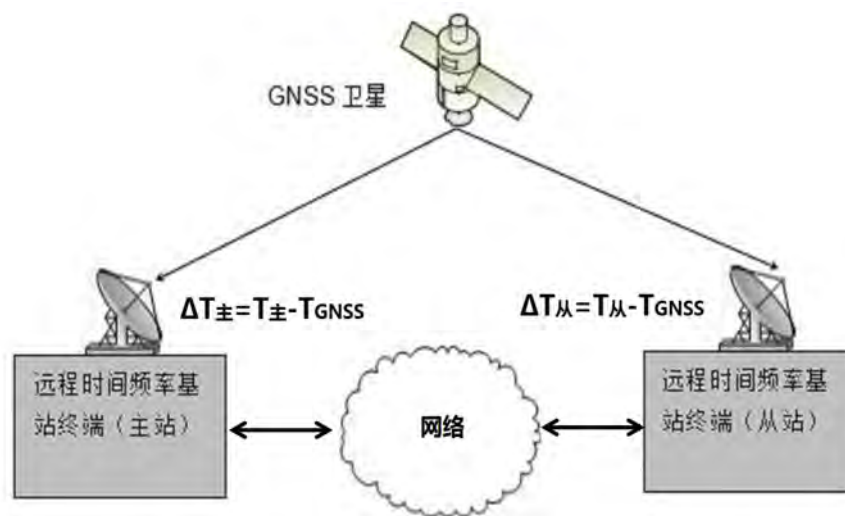


图2 共视法基本原理

卫星共视法本质上是一种伪距差分技术，对卫星到基准站和用户的单向授时误差进行差分，获得优于单向授时方法的精度。目前业界卫星共视法比对精度可达 $\pm 10\text{ns}$ 左右。

卫星共视技术比较成熟，性能较好，但无法独立部署应用，需主从站配合使用，并配置数据通道进行数据交互。不建议基于卫星共视技术实现高精度同步源头，可将其用于网络性能集中监测和高精度同步测量。

2 高精度同步传输实现技术

2.1 优化1588v2实现高精度同步传输

1588v2技术是目前最成熟的高精度时间同步传输技术，在4G时代引入到电信领域，现已在国内大量部署。目前支持1588v2功能的传输设备，单节点时间同步精度为 $\pm 30\text{ns}$ ，在远距离多跳传输时，端

到端性能难以满足高精度同步需求。为提升单节点精度，宜从以下几方面对现有1588v2进行优化：

- 打戳位置尽量靠近物理接口，减少光模块内部的半静态延时误差和动态延时误差。信号流经过光模块，进入接口芯片后，建议在打戳事件经过物理媒介附属（PMA）层时执行打戳动作。
- 提升打戳分辨率，降低采样误差。打戳时的采样误差是影响打戳精度的重要因素，例如，采用125M时钟打戳，误差至少是正负1个时钟周期，即打戳的分辨率只有8ns。因此，需要提升打戳时钟的频率，或者采用其他方法提升打戳分辨率。
- 改进同步算法，提升系统实时时钟（RTC）同步精度。改进同步算法，有助于提升时间同步的精度，特别是优化系统RTC的时间调整粒度，可以显著降低时间同步的动态抖动误差。
- 加强模块间协作，提升系统内部RTC之间的同步精度。系统内部存在多个RTC，这些RTC之间的精确同步，是影响设备级时间同步精度的重要因素，例如，时钟板RTC和业务板RTC之间的同步，涉及到设备内部时间信号分发延时的精确测量。
- 选取优质晶振，提升本地时钟的稳定度。本地时钟（通常采用温补晶振或者恒温晶振）是设备进行各种同步操作的基础。提升本地时钟的频率稳定度，有助于提升时间同步和频率同步的动态性能，并在各种故障情况下获得更好的保持性能。

鉴于1588v2技术在电信网中应用规模大、成熟度高、互联互通性好，建议在现有配置基础上通过优化实现细节提升精度，这样有利于5G高精度时间同步网络的快速部署和成熟商用。考虑到1588v2技术在实际应用中易受光纤不对称性影响，建议5G时间同步网在条件具备时尽量采用单纤双向方式进行1588v2的部署应用。另外，针对1588v2开通和运维，建议引入智能时钟，增强同步网络安全可靠性，提高运维管理效率。

2.2 白兔子技术尝试支持高精度同步传输

白兔子（WR）技术于2008年由欧洲核子研究组织（CERN）提出，设计初衷是实现亚纳秒的分布式时钟同步和具有确定性延时的数据传输，用于加速器的同步控制。

WR技术以标准千兆以太网为基础，使用物理层同步以太网（SyncE）技术实现时钟频率，使用1588v2（PTP）实现时间同步，使用全数字双混频鉴相器（DDMTD）将时间戳同步精度提高到亚纳秒。

针对光纤链路的非对称性问题，WR使用单纤双向技术进行解决，通常采用波分复用（WDM）技

术实现全双工通信，主节点发出的光波长为1490nm，从节点发出的光波长为1310nm，根据不同波长的光在光纤中的折射率不同，可以计算并补偿由此引入的延时不对称性。

WR使用鉴相器精确测量数据恢复时钟与本地时钟的相差并对时间戳进行校正，从而使基于1588v2的时钟同步技术能够实现亚纳秒级精度。此外，从节点端的鉴相器与滤波控制电路以及压控振荡器构成了一个锁相环电路，实现从节点时钟的相位锁定和相位调整功能。

WR实现了一定区域内、多节点、亚纳秒精度的高精度同步信号分发。但考虑应用场景、协议扩展性、硬件支持能力、稳定性、成本等多方面因素，WR目前不适合通信网络的使用。

在新的1588标准草案（IEEE 1588-2019 draft）中，引入WR技术的一些概念，包括物理层相位同步、采用DDMTD技术等，并增加了针对高精度应用的PTP Profile，可实现ns级高精度同步。

总体来看，无论是WR技术，还是新版本1588标准，均属于全新的高精度传输实现方案，相对于1588v2优化方案，实现难度大，目前暂时不作为高精度精度同步传输技术。

3 高精度同步监测技术

3.1 外置方式实现同步性能绝对监测

外置方式可实现同步性能绝对监测，包括两种方式：外置探针方式和卫星共视方式。

- 外置探针方式：在5G同步网中按需部署外置探针装置，探针装置通过全球导航卫星系统（GNSS）获得绝对时间基准，对网络末端设备同步输出信号进行监测，再将监测结果发送至中心网管以实现对整个网络同步性能的实时监测。实现方式可以分为主动式和被动式，其中主动式为探针设备自身作为精确时间同步协议PTP时钟，通过PTP协议与被监测设备进行同步交互；而在被动监测方式下，探针设备不参与网络同步交互，采用镜像方式获取所监测节点的同步交互信息，实现同步性能监测。需要说明的是，基站配置的卫星授时接收机也可实现外置探针的功能，通过自动测量卫星信号与地面信号的时间偏差，完成网络同步性能监测，并可对线路非对称进行自动补偿。

- 卫星共视方式：在网络适当位置部署共视主站和共视从站，根据4部分第1.3节卫星共视技术工作原理，以共视接收作为媒介，通过交换数据，得到共视从站（即被监测点）与共视主站（即远端参考基准，如溯源至UTC的绝对基准）之间的比对结果，实现对被监测点性能的绝对监测。一般来说，

共视网络中共视从站部署于网络下游位置，靠近网络末端，当然，也可以通过人工规划，在网络多个点部署共视从站，从而实现可以覆盖全网的性能监测能力。

3.2 内置方式支持同步性能相对监测

通过内置功能进行同步性能监测，即利用网络设备自身具备的同步性能监测能力实现同步性能相对监测，主要包括下述两种方式：

- 主从监测：Slave设备在同步于主时钟（Master）设备的同时，进行自身同步性能监测。通过对Slave端口时间戳（T1、T2、T3、T4）和计算的时间偏差值（Offset）进行不同方式的统计和分析，可以实现对同步性能的相对监测。该种监测方式的监测参数包括PTP时间偏差实时监测、PTP延时实时监测、PTP时间偏差累加值监测等。

- 环上被动（Passive）节点监测：利用Passive节点对其同步侧与非同步侧同步数据进行比对，从而实现监测。同步网通过BMC算法选择时间源和同步路径，在存在多条同步路径的网络中，例如环网或网格网，会在某个节点决策出Passive端口来避免环路。具有Passive端口的节点，通过Slave端口同步上游节点。通常情况下，Passive端口不会运行PTP协议，可设置该端口工作在探测模式，使其与相连的对端Master端口，通过PTP协议进行时间偏差运算。通过比较设备在Passive和Slave端口分别获得的两个方向的时间偏差的差值，借此进行性能监测。

3.3 基于同步参考链实现相对监测

参照ITU-T8273.2[8]附录VII给出的同步参考链，可对同步簇（相同基站所在区域）内两两相邻节

点之间时间偏差进行监测，如图3所示。对于5G高精度同步，可采用此方式实现同一基站不同AAU之间的性能相对监测。比如，图3中7b、8b、9可对应AAU部署位置，设置节点5为公共参考点，则节点7b和节点9之间的相对时间误差 $TE_{9,7b}$ 可由 $TE_{9,7b}=TE_{9,5}-TE_{7b,5}$ 计算得到，其中，各监测点与公共参考点时间偏差（ $TE_{9,5}$ 、 $TE_{7b,5}$ 等）的获取方法待研究。

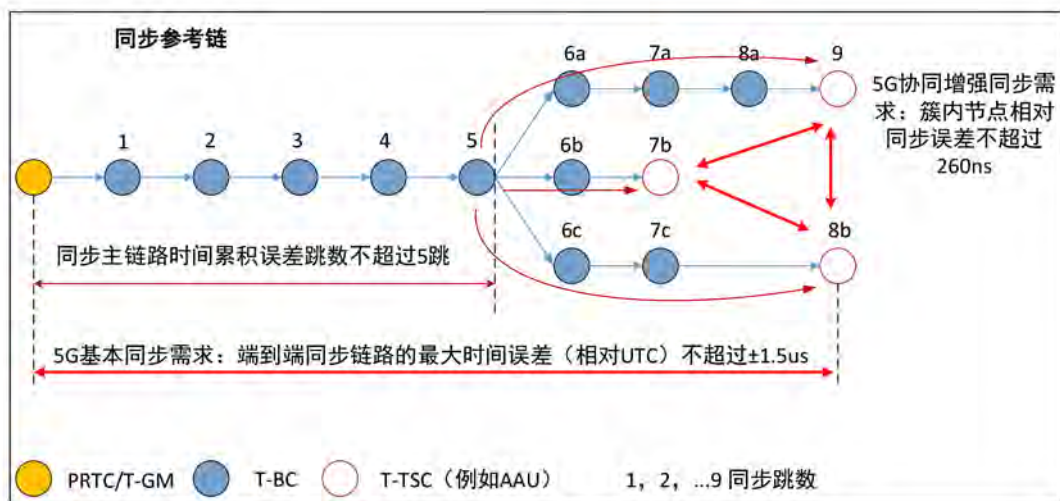


图3 局部相对时间同步监测模型

总结与展望

面向5G的同步需求特性明确，既有与4G相同的微秒量级基本同步需求，也有5G协同增强提出的百纳秒级同步需求，还有以定位需求为代表的纳秒级同步要求。通过5G高精度同步组网，满足5G系统多种业务的同步需求，解决5G网络复杂部署场景同步问题，实现天地互备，避免完全依赖卫星授时带来的安全隐患，进一步提升5G应用的安全可靠性。

从组网方案来看，高精度时间同步通用组网模型给出了端到端的参考点位置和相关要求，是后续5G时间同步网具体组网方案的基本模型。从源头技术来看，卫星单频单向授时性能上无法满足高精度同步需求，当前双频技术更适合于高精度时间同步网的建设部署，共视技术可用于网络同步性能集中监控和高精度测试仪表的实现手段。从同步传输技术来看，1588v2技术目前仍是高精度同步的基本传输技术，可以进一步对其进行改良及增强以满足多场景高精度同步传送需求。从高精度同步监测技术来看，存在基于卫星信号的绝对监测和基于设备自身功能的相对监测等方式，可根据业务要求、网络规模、成本预算等因素进行选择。

随着5G系统商用化不断推进，作为基础支撑网络，5G同步研究及方案部署需进一步加速推动。5G承载工作组将与业界加强合作、聚焦共识，结合运营商5G承载技术及组网架构，继续研究5G同步具体组网技术方案、5G同步网演进策略、高精度同步测试技术等内容，推动制定和完善5G高精度同步方案，全力支撑5G系统商用部署。

主要贡献单位

CAICT 中国信通院

 **中国移动**
China Mobile


China
unicom 中国联通
创新·改变世界

 **中国电信**
CHINA TELECOM
世界触手可及


HUAWEI

ZTE 中兴


FiberHome

NOKIA 上海贝尔

H3C

FINISAR

 **KEYSIGHT**
TECHNOLOGIES

VIavi



联系方式
电话: +86-10-62300164
邮箱: imt2020@catr.cn

COPYRIGHT© 2019IMT-2020 (5G) PROMOTION GROUP.
ALL RIGHTS RESERVED.